



TRATAMIENTO DE UNA SIMULACIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS CON CARBONES ACTIVADOS OBTENIDOS A PARTIR DE PRECURSORES RENOVABLES

P. J. Villegas Aguilar¹; J. O. Prieto García²; Y. Meneses Plasencia²; A. Mollineda Trujillo³; B. Bucki Wasserman⁴

¹Centro de Estudio de Termoenergética Azucarera, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 54830, Cuba. Teléfono: (+53) 42 281194 - Fax: (+53) 42 281608 - email: pjva@fim.uclv.edu.cu

²Departamento de Lic. Química, Fac. Química - Farmacia, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 54830, Cuba. Teléfono: (+53) 42 273173 - Fax: (+53) 42 281608 - email: jopg@divepvc.co.cu

³Centro de Investigaciones Agropecuarias, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 54830, Cuba. Teléfono: (+53) 42 281539 - Fax: (+53) 42 281608

⁴GESE, Unidad Académica Confluencia, Universidad Tecnológica Nacional, Plaza Huincul, 8318, Neuquén, Argentina. Teléfono: (+54) 299 4963292 - Fax: (+54) 299 4960510 - Email: buck@arnet.com.ar

RESUMEN

En este trabajo, se estudia la factibilidad de la eliminación de los iones metálicos pesados Ni^{2+} y Cu^{2+} mediante adsorción con los mejores carbones activados obtenidos por activación con vapor de agua de diferentes precursores renovables. Se empleó un diseño experimental 3^2 para estudiar la influencia simultánea de las variables tiempo de contacto y masa de adsorbente sobre los procesos de adsorción estudiados, realizándose el correspondiente análisis estadístico. El estudio realizado permitió demostrar que los adsorbentes investigados presentan propiedades depuradoras de aguas contaminadas. Se encontró que los resultados experimentales de equilibrio de la isoterma del sistema ión metálico-carbón a las diferentes concentraciones estudiadas se ajustaron de manera satisfactoria al modelo de Langmuir, demostrando características favorables como adsorbente. Finalmente se determinaron los parámetros químico - físicos del proceso de adsorción según el modelo matemático encontrado.

Palabras claves: Adsorción, carbones activados, metales pesados, modelo de Langmuir

I. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua potable de buena calidad es un factor importante para preservar la salud de la población y son conocidas las epidemias causadas por la contaminación de aguas, que en el pasado diezmaron la población. La depuración de aguas contaminadas comprende usualmente un tratamiento primario que elimina sólidos y líquidos en suspensión, seguido de un tratamiento secundario de tipo biológico y un tratamiento terciario donde se eliminan contaminantes recalcitrantes que no han sido completamente separados en las etapas anteriores. Entre estos últimos se encuentran algunos metales pesados que aún en muy baja concentración son altamente tóxicos, requiriéndose el empleo de adsorbentes altamente selectivos a éstos, en este sentido, los carbones activados presentan amplias posibilidades de aplicación en la remoción de estos contaminantes indeseables. Una de las posibilidades de rebajar su concentración por debajo de los límites máximos permitidos es mediante su adsorción en carbón activado. La adsorción en carbones activados se utiliza ampliamente en plantas de tratamiento de aguas para la eliminación de olores, de sabores y para la separación de compuestos orgánicos pero además, como se ha señalado, en esta etapa se pueden separar los metales pesados (Arriagada y col. 2002).

En el marco de estos antecedentes, el presente trabajo se plantea como objetivo, emplear un método que permita ampliar las aplicaciones de carbones activados obtenidos a partir de fuentes renovables, en el tratamiento de aguas contaminadas.

II. PARTE EXPERIMENTAL

Para este trabajo se seleccionaron carbones activados, todos los obtenidos en el Laboratorio Químico del CETA, a partir de diversas materias primas tales como: semillas de mamey, cáscaras del fruto de las caobas africana y hondureña y cáscaras de coco. Para esta selección se consideró las propiedades adsorbentes de estos productos. Se utilizaron los carbones activados preparados mediante activación de estos materiales con vapor de agua, ya que según se reporta en la literatura la adsorción de metales pesados se favorece en medio básico y todos estos productos presentan un pH superior a 7 (Villegas Aguilar, P. J. y col., 2001).

Para la obtención de los carbones activados el material fue secado en estufa durante 24 horas a la temperatura de 120°C, molido y tamizado, hasta obtener una granulometría adecuada. Para obtener carbones activados por la técnica de activación con vapor de agua se tomó una masa conocida de los precursores y se pirólicó a la temperatura de 550°C con un flujo de nitrógeno de 80 ml /min. El producto sólido de la pirólisis (char) se activa a diferentes temperaturas y tiempos de activación en un reactor de lecho fijo de acero inoxidable de 30 cm de longitud y 2.5 cm de diámetro, al cual se suministra vapor de agua a 10ml/min. a través de un tubo de 0.8 cm de diámetro del mismo material conectado a la parte inferior del reactor, los gases producto de la reacción se evacúan por la parte superior del reactor a través de un conducto de diámetro similar. Las condiciones de operación empleadas en cada caso se correspondieron con las mas eficientemente comprobadas obtenidas para cada materia prima estudiada (Villegas Aguilar y col. 2002a, b, c).

II.1. Evaluación de la capacidad de purificación de aguas contaminadas

En este trabajo se analizó la capacidad de eliminación de los metales pesados Ni^{2+} , Cu^{2+} y Cd^{2+} mediante adsorción con carbones activados, para ello se realizaron algunos ensayos preliminares a fin de determinar los mejores adsorbentes y realizar el estudio completo con estos. En este sentido, se tomó una masa conocida de los carbones activados estudiados y se pusieron en contacto un determinado tiempo con soluciones patrones de estos iones en concentraciones iniciales de alrededor

de 50 mg / l. Las soluciones luego se filtraron y su composición se analizó con un Espectrómetro de Absorción Atómica PYE UNICAM SP9 de procedencia alemana para el caso de los iones Ni^{2+} y Cu^{2+} , mientras que para el estudio de la adsorción de Cd^{2+} se empleó un fotómetro HIDROCHECK de procedencia inglesa, empleando el métodos que se basa en el cambio de intensidad del color del complejo rojo-naranja resultante de la reacción entre el Cadmio y el 1-(4-nitrofenil)-3-(4-fenilazofenil) triazina en una solución buffer a 520nm. Una vez seleccionados los adsorbentes más adecuados, se desarrolló un estudio detallado de la adsorción de los iones Ni^{2+} y Cu^{2+} variando los tiempos de contacto entre 4 y 12 horas y las masa de adsorbente entre 1 y 3 g/l, lo cual se realizó de acuerdo con un diseño experimental factorial 3^2

Asimismo, se determinaron las concentraciones de los aniones cloruro y nitrato, con el auxilio del fotómetro HIDROCHECK. Para ello se siguió, en el caso del ión cloruro, el procedimiento basado en la medición de la intensidad del color naranja del ión complejo tiocianato resultante de la reacción del cloruro con el tiocianato de mercurio en presencia de una sal de hierro a 445 nm. La determinación de la concentración del ión nitrato se realizó midiendo el cambio en la intensidad del color amarillo-carmelita resultante del complejo formada a partir de la reducción del ión nitrato a ión nitroso seguido de la reacción con ácido 5-hidroxi-salicílico a 520 nm.

II.2. Determinación de los parámetros cinéticos y termodinámicos del proceso de adsorción

Para la realización de estos ensayos fue necesario construir la isoterma de adsorción de los metales pesados bajo estudio, para ello se grafica la concentración adsorbida vs la concentración de equilibrio. Para determinar la primera de estas concentraciones se empleó la expresión (1) que se presenta seguidamente y la concentración de equilibrio se tomó como la concentración de la solución luego de lograda la máxima adsorción posible en un tiempo determinado.

$$C_{\text{ads}} = \frac{(C_i - C_s)}{S * m} \quad (1)$$

donde:

C_{ads} : es la concentración adsorbida expresada en $\text{mg}/(\text{l} * \text{cm}^2)$;

C_s : es la concentración del ión en solución luego de sometida a la acción del adsorbente un determinado tiempo, expresada en mg/l ;

C_i : es la concentración inicial del ión en solución expresada en mg/l ;

S : es la superficie específica del carbón expresada en cm^2/g ;

m : es la masa de carbón empleada en el estudio expresada en g.

Luego de construida la isoterma de adsorción se procedió a definir el modelo teórico mediante el cual se determinarían las magnitudes del proceso de adsorción de cada uno de los metales pesados de interés sobre los adsorbentes estudiados, para ellos se realizaron diferentes correlaciones hasta definir el modelo más adecuado y luego las magnitudes correspondientes al mismo. Seguidamente se determinaron los parámetros característicos de los procesos de adsorción (coeficientes de difusión externa e interna), de acuerdo con el modelo previamente seleccionado. Por último, se determinó la energía de activación del proceso de adsorción, la cual se dedujo partiendo de la ecuación de Arrhenius (Alberty y Silbey, 1997):

$$\frac{dB}{dt} = e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

donde B es la constante de velocidad del proceso de difusión interna (h^{-1});

Transformando la expresión (2) se llega a la ecuación empleada para determinar la energía de activación del proceso de adsorción, que viene dada por:

$$E_a = -R * \frac{T_1 * T_2}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{B_2}{B_1} \right) \quad (3)$$

Para obtener el valor de este parámetro cinético-termodinámico se realizó el estudio de la adsorción a dos temperaturas diferentes que fueron 30 y 60°C, determinándose previamente el valor B a ambas temperaturas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan las densidades aparentes (d_{ap}), pH e índices de yodo de los mejores carbones activados obtenidos mediante activación con vapor de agua. Como puede apreciarse, todos los productos estudiados presentan valores d_{ap} similares; nótese además que los valores de pH en todos los casos son básicos, lo que permite su uso en este estudio.

Muestra	d_{ap} (g/ml)	pH	Iy
Carbón activado de semillas de mamey a 800°C y 60 min.	0.277	8.0	998
Carbón activado de cáscaras del fruto de la caoba africana a 700°C y 60 min.	0.220	7.7	589
Carbón activado de cáscaras del fruto de la caoba hondureña a 800°C y 60 min.	0.217	8.8	950
Carbón activado de cáscaras de coco a 800°C y 60 min.	0.287	7.4	990

Tabla 1. Densidades aparentes (d_{ap}), pH e índices de yodo (Iy) de los de los mejores carbones activados obtenidos mediante activación “física” de diferentes precursores renovables con vapor de agua.

III.1. Estudio preliminar de la capacidad de purificación de aguas contaminadas

Para evaluar la capacidad de adsorción de los carbones activados se utilizó 1g/l de carbón activado en la adsorción de 50 mg/l de Cu^{2+} durante dos horas para definir si los adsorbentes eran adecuados para los fines que se deseaban, desechando aquellos adsorbentes que no respondieron a las expectativas del ensayo preliminar

III.2. Estudio de la capacidad de purificación de aguas contaminadas

Para realizar este estudio se siguió el diseño experimental 3^2 previamente definido para estudiar la influencia simultánea de las condiciones de operación tiempo de exposición y masa de adsorbente sobre la capacidad de remoción de los iones Ni^{2+} y

Cu^{2+} en un litro de soluciones acuosas, sobre el carbón activado obtenido a partir de las semillas de mamey a 800°C y 60 min., que fue el de mayor capacidad de adsorción (índice de yodo). En la Tabla 2 se presentan los resultados del diseño experimental aplicado.

Experimento	m (g)	t de exposición(h)	% Ni^{2+} ads.	% Cu^{2+} ads.
1	1.0	4	16.9	38.19
2	1.0	8	20.63	41.48
3	1.0	12	23.38	47.25
4	2.0	4	17.88	54.34
5	2.0	8	24.56	60.99
6	2.0	12	26.92	61.81
7	3.0	4	20.83	68.13
8	3.0	8	31.24	74.45
9	3.0	12	36.74	77.75

Tabla 2. Resultados de la aplicación del diseño 3^2 a la adsorción de Ni^{2+} y Cu^{2+} en un litro de soluciones acuosas sobre el carbón activado obtenido a partir de las semillas de mamey.

Debe notarse en la Tabla anterior que la adsorción de los iones Cu^{2+} es mucho mayor que la de Ni^{2+} , lo que indica una mayor selectividad del adsorbente por este ión. Los valores de remoción se alcanzan bajo las condiciones más extremas, esto es 3.0 g/l de adsorbente y 12 horas de exposición. Estos resultados hacen suponer que la exposición a tiempos más prolongados podría mejorar la remoción de estos iones, lo cual se comprobó no era recomendable, ya que no se lograron incrementos significativos en la adsorción de los mismos.

El análisis estadístico de la Tabla 2 arrojó que la variación de los porcentajes de remoción de los iones níquel y cobre ($\% \text{Ads}_{\text{Ni}^{2+}}$ y $\% \text{Ads}_{\text{Cu}^{2+}}$) respecto a las variables independientes masa de adsorbente (m) y tiempo (t), se ajustaba a la expresiones siguientes con un coeficientes de correlación $R^2 = 0.9908$ y 0.9955 , respectivamente:

$$\% \text{Ads}_{\text{Ni}^{2+}} = 14.4344 + 1.8325 * t - 0.7398 * m \quad (4)$$

$$\% \text{Ads}_{\text{Cu}^{2+}} = 11.5278 + 2.0813 * t + 13.75 * m \quad (5)$$

Se realizó un estudio comparativo de la adsorción de estos mismos iones con los mejores carbones activados obtenidos mediante activación con vapor de agua de las cáscaras del fruto de las caobas africana y hondureña, así como las cáscaras de coco, lo cual se presenta en la Tabla 3, siguiendo el diseño experimental que se utilizó en todo el trabajo o sea 3^2 .

Carbón activado de:	% Ni^{2+} ads.	% Cu^{2+} ads.
Semillas de Mamey	36.74	77.75
Cáscaras del fruto de la Caoba Africana	34.81	67.66
Cáscaras del fruto de la Caoba Hondureña	36.74	77.98
Cáscaras de Coco	28.74	55.28

Tabla 3. Estudio comparativo de la adsorción de Ni^{2+} y Cu^{2+} sobre 3g/l de carbones activados obtenidos a partir de diferentes precursores durante 12 horas de exposición.

Debe notarse en la Tabla 3 que el carbón activado obtenido a partir de las cáscaras del fruto de la caoba hondureña presenta propiedades depuradoras de metales pesados similares a los de adsorción estudiados, en este caso el de semillas de mamey, lo que indica que el tener una elevada capacidad de adsorción, expresada en términos de índice de yodo, no es razón definitiva en la eliminación de una determinada sustancia. Los resultados de la incidencia del tratamiento de la simulación de aguas contaminadas con los carbones activados analizados en la composición aniónica de las soluciones así como la efectividad en la remoción del cadmio presente en las soluciones acuosas analizadas se presenta en la Tabla 4.

Carbón activado de:	% Ads. Cl^-	% Ads. NO_3^-	% Ads. Cd^{2+}
Semillas de Mamey	16.4	12.12	83.64
Cáscaras del fruto de la Caoba Hondureña	16.5	21.21	89.09

Tabla 4. Efecto del tratamiento con carbones activados obtenidos mediante activación con vapor de agua de semillas de mamey y cáscaras del fruto de la caoba hondureña sobre los aniones Cl^- y NO_3^- y el Cd^{2+} presente en solución acuosa.

Debe notarse en la Tabla anterior que los dos carbones activados estudiados son excelentes adsorbentes de otro metal pesado de gran interés como lo es el Cd^{2+} , al mismo tiempo son adecuados para adsorber mínimas cantidades de cloruro y nitrato, dos aniones cuyas concentraciones en solución deben controlarse exhaustivamente. Estos resultados hablan a favor de las amplias posibilidades de eliminar sustancias indeseables que presentan ambos adsorbentes.

III.3. Determinación de las magnitudes que caracterizan los procesos de adsorción estudiados

Para evaluar comparativamente la capacidad de remoción de impurezas metálicas en solución acuosa se determinaron las isothermas de adsorción de Ni^{2+} y Cu^{2+} sobre carbones activados obtenidos a partir de cáscaras del fruto de la caoba hondureña y semillas de mamey, las cuales se presentan en las Figuras 1 y 2 que se muestran a continuación.

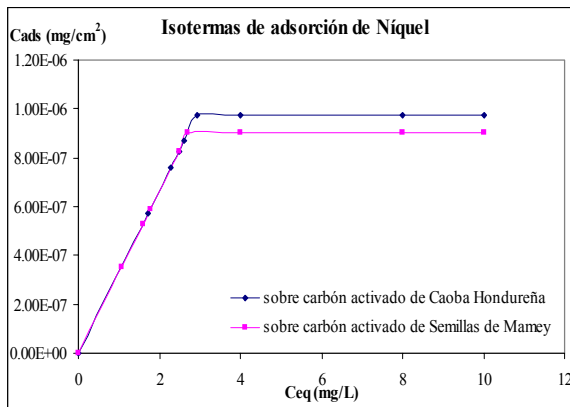


Figura 1. Isotermas de adsorción de Ni^{2+} sobre carbones activados obtenidos mediante activación con vapor de agua de cáscaras del fruto de la caoba hondureña y semillas de mamey.

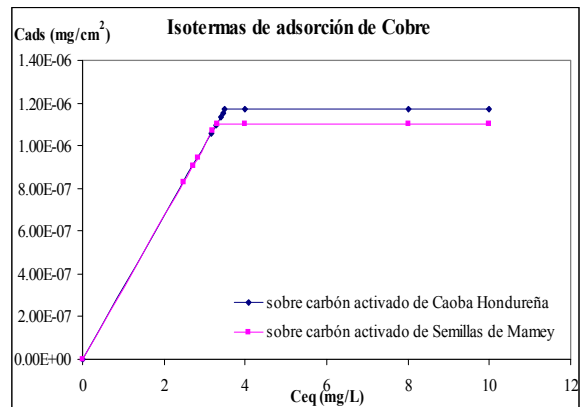


Figura 2. Isotermas de adsorción de Cu^{2+} sobre carbones activados obtenidos mediante activación con vapor de agua de cáscaras del fruto de la caoba hondureña y semillas de mamey.

Debe notarse en las Figuras 1 y 2 que las isotermas presentan una igual forma, lo que indica que ambos adsorbentes se comportan de manera similar en los procesos de adsorción estudiados, asimismo debe observarse que en ambos casos el carbón activado obtenido a partir de las cáscaras del fruto de la caoba hondureña presenta un poder adsorbente ligeramente superior. A partir de las isotermas anteriores se determinan los parámetros cinéticos que caracterizan los procesos de adsorción de cada uno de los iones estudiados sobre los dos adsorbentes de interés. Primero que todo se define el modelo al cual se ajustan las mismas, en este sentido se construyen los gráficos de C_s/q_a vs C_s , donde: C_s es la concentración del soluto que quedó en la solución luego de sometido a la acción del adsorbente un determinado tiempo, y q_a un parámetro que expresa la relación de la concentración de soluto adsorbida luego del contacto con el adsorbente por cada g/l de adsorbente. Este comportamiento permite determinar si estas isotermas se adecuan al modelo del Langmuir. Se presentan en las Figuras 3 y 4 los gráficos de C_s/q_a vs C_s correspondientes a la adsorción de níquel y cobre sobre los carbones activados analizados, mostrándose en cada uno de los casos el coeficiente de correlación correspondientes.

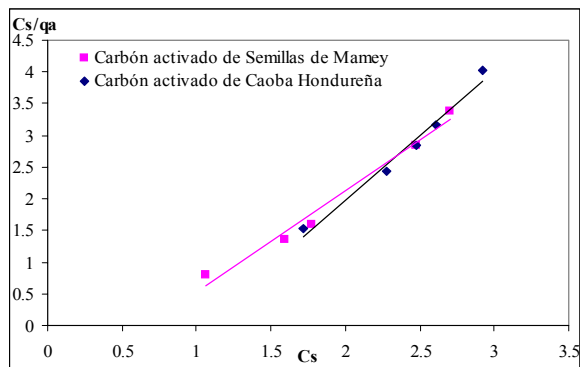


Figura 3. Gráfico de C_s/q_a vs C_s correspondiente a la adsorción de Ni^{2+} sobre carbones activados de semillas de mamey ($R^2 = 0.9218$) y cáscaras del fruto de la caoba hondureña ($R^2 = 0.9738$).

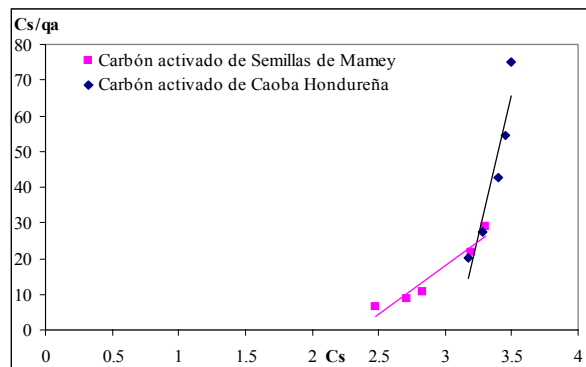


Figura 4. Gráfico de C_s/q_a vs C_s correspondiente a la adsorción de Cu^{2+} sobre carbón activado de semillas de mamey ($R^2 = 0.9937$) y de cáscaras del fruto de la caoba hondureña ($R^2 = 0.9993$).

Como se observa en los dos casos (Figuras 3 y 4), el modelo de Langmuir representa adecuadamente los datos experimentales obtenidos con un elevado coeficiente de correlación que supera en todos los casos el 0.9, especialmente para la adsorción de cobre, donde este valor es casi de 1. Asimismo, se construyeron los gráficos logarítmicos de $\ln q_a$ vs $\ln C_s$, a modo de corroborar si el modelo de Freundlich se adaptaba a los datos experimentales estudiados, no obteniéndose una buena correlación, por lo que se desecha este modelo. Luego de definido que el modelo matemático a emplear es el de Langmuir, se procedió a determinar las magnitudes correspondientes al mismo, en este sentido se define la capacidad de adsorción en solución (Q_a) de acuerdo con la expresión siguiente:

$$Q_a = \frac{(C_0 - C_a) * V}{m * 1000} \quad (6)$$

donde:

Q_a : es la capacidad de adsorción estática (mg/g);
 $C_0 = C_i$: es la concentración inicial del ión estudiado en solución (mg/l);

C_a : es la concentración en equilibrio (mg/l);
 V : es el volumen de solución (l);
 m : es la masa de adsorbente empleada en el experimento (g).

El valor de Q_a también suele determinarse según la expresión siguiente:

$$Q_a = \frac{Q * K * C_a}{1 + K C_a} \quad (7)$$

donde:

Q_a : es la capacidad de adsorción estática (mg/g);
 C_a : es la concentración en equilibrio (mg/l);
 K : es una constante (l/mg);

Q : es el peso del adsorbato sobre la monocapa (g de soluto/g de adsorbente (g_s/g_a)).

La expresión 6 suele transformarse para obtener la expresión que se presenta a continuación:

$$\frac{C_a}{Q_a} = \frac{1}{Q \cdot K} + \frac{C_a}{Q} \quad (8)$$

A partir de la expresión (7) pueden determinarse los valores de Q y K que caracterizan los procesos de adsorción en solución estudiados, si se grafica C_a/Q_a vs C_a , obteniéndose una recta cuya pendiente se corresponde con el valor de $1/Q$ y el intercepto $1/(Q \cdot K)$. Otro parámetro que comúnmente se determina para este tipo de modelo es el factor de separación de Langmuir (f_s), que puede determinarse a partir de la ecuación que se indica a continuación:

$$f_s = \frac{1}{1 + Q C_0} \quad (9)$$

En la Tabla 5 se presentan los valores de Q , K y r para cada uno de los iones y adsorbentes estudiados.

Par. cinético	Carbón activado de Semillas de Mamey		Carbón activado de cáscaras del fruto de la Caoba Hondureña	
	Adsorción de Ni^{2+}	Adsorción de Cu^{2+}	Adsorción de Ni^{2+}	Adsorción de Cu^{2+}
Q (g_s/g_a)	0.6244	0.0365	0.4897	0.0065
K (l/mg)	- 1.4873	- 0.4267	- 0.9710	- 0.3249
f_s	0.2393	0.8827	0.2863	0.9769

Tabla 5. Parámetros cinéticos de la adsorción de cationes metálicos pesados (Ni^{2+} y Cu^{2+}) sobre carbones activados obtenidos mediante activación con vapor de agua de semillas de mamey y cáscaras del fruto de la caoba hondureña.

Para encontrar los parámetros característicos de los procesos de adsorción estudiados, de acuerdo con el modelo de Langmuir, es común el cálculo de los coeficientes de difusión externo e interno (Prieto García y col., 2002), a modo de poder determinar cuál de los dos procesos es el determinante, en este sentido se parten de las expresiones que a continuación se presentan:

$$D_i = \frac{0.03 \cdot r^2}{t_{0.5}} \quad (10)$$

donde: r : es el radio promedio de partículas de adsorbente empleadas en el análisis (cm);
 $t_{0.5}$: es la mitad del tiempo en que logra alcanzarse la máxima adsorción.

Luego de determinar el coeficiente de difusión interna (D_i), debe calcularse la constante de velocidad de difusión interna (B), que viene dada por la expresión siguiente:

$$B = \frac{\pi^2 \cdot D_i}{r^2} \quad (11)$$

Posteriormente se procedió a calcular el coeficiente de difusión externa (D_e) (Prieto García y col., 2002), para lo cual se partió de la siguiente expresión:

$$D_e = \frac{\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) \cdot r \cdot \Delta r}{3 \cdot C_0} \quad (12)$$

donde: $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)$: es la velocidad de adsorción del ión en equilibrio (mg/h);
 C_0 : es la concentración inicial del ión estudiado en solución (mg/l);
 Δr : es espesor de la capa de difusión (cm).

Al igual que en el caso anterior debe determinarse previamente la constante de velocidad del proceso de difusión externa (R), cuya expresión es la siguiente:

$$R = \frac{\Delta Q / \Delta t}{C_{t_{0.5}} \cdot K} \quad (13)$$

donde: $C_{t_{0.5}}$: es la concentración en el tiempo medio;
 K : es el coeficiente de equilibrio de distribución de la concentración del catión en solución al tiempo medio.

Los valores de $C_{t_{0.5}}$ y K se determinan de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$C_{t_{0.5}} = \frac{C_0 - C_{eq}}{2} \quad (14) \quad K = \frac{C_z}{C_{t_{0.5}}} \quad (15)$$

$$\text{siendo: } C_z = \frac{C_0 - C_{t_{0.5}}}{m} \cdot 1000 \quad (16)$$

donde C_{eq} es la concentración en solución del ión analizado cuando se alcanza el equilibrio;

En la Tabla 6 se presentan los valores de los coeficientes de difusión interna y externa, así como los valores de las constantes de velocidad de difusión correspondientes a cada uno de ellos. El modelo de adsorción localizada sin interacciones laterales conlleva a una superficie energéticamente homogénea. En esta superficie se tienen N sitios de adsorción fijos donde se puede acomodar en un adsorbido, existiendo N_a iones adsorbidos y $N - N_a$ sitios libres.

Par. cinético	Carbón activado de Semillas de Mamey		Carbón de cáscaras del fruto de la Caoba Hondureña	
	Adsorción de Ni ²⁺	Adsorción de Cu ²⁺	Adsorción de Ni ²⁺	Adsorción de Cu ²⁺
D _i (cm ² /h)	0.0882	0.1325	0.0882	0.1325
B (h ⁻¹)	1.7748	2.6676	1.7748	2.6676
D _e (cm ² /h)	6.37x10 ⁻⁷	2.17x10 ⁻⁶	8.93x10 ⁻⁷	2.63x10 ⁻⁶
R (h ⁻¹)	1.29x10 ⁻⁵	3.24x10 ⁻⁵	1.64x10 ⁻⁵	3.56x10 ⁻⁵

Tabla 6. Coeficientes de difusión interna (D_i) y externa (D_e), y constantes de velocidad de difusión correspondientes a cada uno de ellos, B y R, respectivamente.

Por último se determinaron los valores de la energía de activación que caracterizaba a los procesos de adsorción estudiados, según la expresión (3) definida previamente, los valores obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Parámetro Qco.-Fco.	Carbón activado de Semillas de Mamey		Carbón de cáscaras del fruto de la Caoba Hondureña	
	Adsorción de Ni ²⁺	Adsorción de Cu ²⁺	Adsorción de Ni ²⁺	Adsorción de Cu ²⁺
Ea (kJ/mol)	1.211	1.410	1.211	1.410

Tabla 7. Energías de activación de los procesos de adsorción estudiados.

Los valores de la Tabla anterior son relativamente bajos, lo que indica que los procesos difusivos inter-partículas se ven favorecidos, y con ello la pronta eliminación de los metales pesados estudiados con una mínima barrera energética.

IV. CONCLUSIONES

1. Se demostró que los adsorbentes estudiados presentan excelentes propiedades depuradoras de aguas contaminadas tanto con metales pesados como con aniones indeseables. El estudio realizado permitió demostrar que la capacidad de adsorción de un adsorbente no es magnitud definitoria en su selectividad por la eliminación de un determinado contaminante.
2. Los resultados experimentales de equilibrio de la isoterma del sistema ión metálico-carbón a las diferentes concentraciones estudiadas se ajustan de manera satisfactoria al modelo de Langmuir, demostrando características favorables como adsorbente. Se encontró que los menores valores del peso de adsorbato sobre la monocapa (Q) obtenidos durante la adsorción de cobre (II) sobre los adsorbentes estudiados indican que en este proceso las interacciones adsorbato-adsorbente, son mayores que las adsorbente-adsorbente por lo que la adsorción se ve más favorecida, contrario a lo que se obtiene en la adsorción de níquel (II), donde los valores de Q son superiores.
3. Se observó que tanto para la adsorción de níquel (II) como la de cobre (II) sobre ambos adsorbentes los coeficientes de difusión externa resultaron ser menores que los correspondientes a la interna, lo que indica que la difusión externa es la controlante del proceso de adsorción.

V. REFERENCIAS

1. Alberty R.; Silbey, R. "Physical Chemistry". 2nd Edition, **1997**.
2. Arriagada, R.; García, R.; Cid, R.. Retención de Hg(II) y Cr(VI) en carbones activados de origen lignocelulósico". *Informe de Investigaciones*. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción . Chile, **2002**.
3. Prieto García, J. O.; Villegas Aguilar, P. J.; Primelles, E.; Bucki Wasserman, B.; Molina Ibáñez, S. "Estudio de la sorción e intercambio de iones Ni (II) mediante impulsos ultrasónicos en un producto zeolitoide". *AVERMA*, 6,, **2002**.
4. Villegas Aguilar, P. J.; Medina Alvarez, B. F.; de las Posas del Río. C. E, Bucki Wasserman, B. "Preparación de carbones activados a partir de fuentes renovables" *AVERMA*, 5, **2001**.
5. Villegas Aguilar, P. J.; Medina Alvarez, B. F.; de las Posas del Río, C. E. "Sugar Cane Mill Fibrous Wastes Gasification: on the Feasibility for the Manufacture of Granular Activated Carbon". *Proceeding of the Sixth APISCEU*, Malaysia, may **2002**.
6. Villegas Aguilar, P. J.; Medina Alvarez, B. F.; de las Posas del Río, C. E. Production of Granular Activated Carbon by Controlled Gasification of some Agricultural Resources with Steam Water. *Proceeding of the Sixth APISCEU*, Kuala Lumpur, may **2002**.
7. Villegas Aguilar, P. J.; Medina Alvarez, B. F.; de las Posas del Río, C. E.; Bucki, B. "Algunas consideraciones sobre la factibilidad de preparar carbones activados a partir de fuentes renovables tropicales". *AVERMA*, 6, **2002**.

ABSTRACT

Feasibility in elimination of heavy metallic ions Ni (II) and Cu (II) is studied by adsorption with activated carbons which have been obtained by stream activation of different renewable sources. A 3² experimental design was used to study the simultaneous influence of the variables: contact time and adsorbent mass in each adsorption process, while the correspondent statistical analysis was being carried out. This work demonstrates that the studied products have good purifying for treatment of heavy metallic ions polluted water. It was found that the experimental results of equilibrium in the isotherm of the metallic ion – carbon system studied at different concentrations could be adjusted satisfactory to the Langmuir's model showing favorable characteristics as adsorbents.

Key word: Adsorption, activated carbons, heavy metals, Langmuir Model